

智慧交通系统电力能耗优化与节能研究

梁 浩¹, 申晓露², 王洪彬³

- (1. 滨州国投测绘有限公司, 山东 滨州 256600;
2. 济南翱瀚动力科技有限公司, 山东 济南 250013;
3. 莱西市交通运输局, 山东 青岛 266600)

摘 要 针对智慧交通系统全场景电力能耗管控的核心需求, 本文系统分析了智慧交通系统电力能耗的构成单元与负荷特性, 厘清了设备能效、系统调度、供配电网架、运行工况四大维度的核心影响因素, 构建了覆盖设备级、系统级、供配电级、全周期管控的一体化电力能耗优化与节能技术体系, 明确了优化方案的分阶段实施路径与量化评定方法。结果表明, 该技术体系可实现智慧交通系统综合节电率 20% 以上, 有效解决系统内设备空载能耗高、多系统协同效率低、供配电损耗大等核心问题, 为智慧交通系统的低碳化、高效化运行提供系统性技术支撑。

关键词 智慧交通系统; 电力能耗; 能耗优化; 节能技术; 能效管控

中图分类号: U116; U491.1+7; TM732 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.007

0 引言

智慧交通系统是集感知、通信、计算、控制于一体的复杂交通管控体系, 其稳定运行高度依赖电力能源的持续供给, 电力能耗的管控水平直接决定系统的运行经济性与低碳化程度。本文围绕智慧交通系统的电力能耗核心特征, 系统梳理其能耗构成与影响机制, 构建全维度的能耗优化与节能技术体系, 明确优化方案的实施路径与效果评定规范, 为智慧交通系统的能效提升与节能改造提供技术参考。

1 智慧交通系统电力能耗构成与负荷特性

1.1 核心能耗单元构成

智慧交通系统的电力能耗可划分为五大核心单元, 各单元的能耗特征与占比存在显著差异。一是交通管控与信号系统, 包括路口信号机、区域控制器、匝道控制设备, 能耗以恒定基础功耗叠加动态工作功耗为主, 是交通管控的核心耗能单元; 二是智能感知与车路协同系统, 包括视频监控设备、毫米波雷达、路侧通信单元 RSU, 多为 24 小时连续运行, 是系统内能耗占比最高的单元之一; 三是智慧道路照明系统, 包括道路 LED 路灯、隧道智能照明、匝道补光设备, 能耗具有显著的时间节律特性, 占道路配套系统总能耗的 60% 以上; 四是通信与计算系统, 包括边缘计算节点、路段通信基站、中心机房服务器及配套设备, 能耗以

恒定基础负载为主, 受数据处理量与传输规模影响显著; 五是供配电与辅助系统, 包括配电变压器、高低压配电柜、UPS 电源、输电线路, 能耗以线路阻性损耗、变压器空载与负载损耗为主^[1]。

1.2 核心负荷特性

智慧交通系统的电力负荷呈现三类典型特性。一是时序特性, 可划分为三类负荷: 恒定负荷, 包括机房设备、感知监测设备, 全天负载波动幅度小于 10%; 周期性波动负荷, 包括照明系统、信号控制系统, 负荷随昼夜、季节变化呈现规律性波动; 随机波动负荷, 随实时交通流量变化动态调整, 平峰与高峰时段负载差异可达 50% 以上; 二是空间分布特性, 呈现点状集中与线状分布结合的特征, 路口节点、长隧道、高架路段为能耗密集区, 单路口能耗密度可达普通路段的 8 倍~10 倍; 三是能效耦合特性, 多系统能耗存在强耦合关系, 实时交通流量的变化会同时影响信号配时策略、感知设备采样帧率、道路照明亮度, 单一系统的参数调整会引发全系统能耗的联动变化, 需通过协同管控实现整体能效最优。

2 智慧交通系统电力能耗核心影响因素

2.1 设备层面因素

设备自身能效水平与运行模式是能耗管控的基础变量。一是设备能效等级差异, 符合国家 1 级能效标

作者简介: 梁浩 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

准的设备与老旧高耗能设备相比,基础功耗可降低30%以上,电源转换效率提升20%,低能效设备的空载损耗、待机损耗是无效能耗的核心来源;二是设备运行模式适配性不足,多数终端设备采用固定满负荷运行模式,无法根据交通工况、环境条件动态调整运行参数,低流量时段空载、轻载能耗占比可达总能耗的60%以上;三是设备全生命周期运维水平不足,老化设备的能耗较额定值上升15%~30%,设备故障、接触不良、参数漂移等问题会引发额外能耗,运维缺失会导致系统能效持续下降。

2.2 系统层面因素

系统架构与调度策略决定了整体能效的上限。一是多系统协同调度能力不足,交通管控、照明、感知、通信系统多为独立建设、独立运行,数据壁垒导致无法实现工况联动,难以形成全局最优的能耗控制策略;二是计算与通信架构不合理,集中式计算模式导致大量无效数据向云端传输,中心机房服务器长期处于高负载运行状态,无效数据传输与冗余计算占比可达总计算能耗的40%以上;三是控制策略精细化程度不足,固定信号配时、固定照明亮度、固定采样帧率等粗放式控制模式,无法适配交通流量的时空分布差异,造成大量无效能耗^[2]。

2.3 供配电系统因素

供配电系统的能效水平直接决定电能的利用效率。一是网架结构设计不合理,长距离低压供电、线缆截面选型不当,会导致线路阻性损耗显著增加,部分老旧路段线路损耗占比可达供电总量的10%以上;二是变压器运行效率偏低,变压器容量配置与实际负荷不匹配,长期处于30%以下的低负载率区间,空载损耗占比显著提升,运行效率远低于最优区间;三是电能质量问题,系统内大量非线性负载产生的谐波污染,会引发设备附加损耗与发热,无功功率不足导致功率因数偏低,增加线路与变压器的无功损耗,进一步降低电能利用效率。

2.4 运行工况与环境因素

外部工况与环境条件是能耗波动的重要诱因。一是交通流量的时空分布差异,城市道路平峰、夜间低流量时段占比可达全天的60%以上,设备仍保持满负荷运行,是能效浪费的核心场景;二是气候与光照条件变化,未根据自然光照强度、天气状况动态调整照明亮度与补光策略,阴雨天气、昼夜交替时段易出现无效能耗;三是冗余设计导致的低效运行,为保障极端工况下的系统可靠性,多数设备采用过度冗余设计,

日常运行中长期处于低效负载区间,造成持续的能效浪费。智慧交通系统的能耗管控逻辑,也已从传统零散的设备端节能替换改造,转向覆盖全系统、全业务链条的能效协同优化。从国内已投运项目的现场运维数据来看,智慧交通系统的能效损耗与能耗浪费,极少由单一因素独立引发,工程中绝大多数的能效短板,本质上是设备、调度、供配电、运维等多维度影响因素耦合叠加形成的系统性问题。设备端自身能效不足,会直接放大粗放式调度策略带来的无效能耗;供配电系统的线路与变压损耗,会大幅抵消系统协同优化带来的节能收益;而全生命周期运维管控的缺位,会让前期落地的各项优化措施效果持续衰减,最终无法实现长期稳定的节能目标。目前国内多数智慧交通建设项目仍普遍存在“重功能落地、轻能效管控”的通病,缺乏覆盖全生命周期的系统性能效管控机制,单一、碎片化的节能措施难以实现全局能效最优,亟需构建一体化的能耗优化与节能技术体系,破解多系统协同管控的核心痛点。

3 智慧交通系统电力能耗优化与节能技术体系

3.1 设备级源头节能优化技术

设备级优化是能耗管控的基础,核心是实现源头降耗。一是高效设备适配与替换,选用符合国家1级能效标准的低功耗终端设备,替换老旧高耗能设备,重点推广高光效LED照明灯具、低功耗边缘计算节点、高效信号控制设备,从硬件层面降低设备基础功耗;二是设备动态功率调节与智能休眠,基于实时交通流量数据,动态调整感知设备采样帧率、路侧单元发射功率、控制器运行频率,夜间低流量时段使非核心设备进入低功耗休眠模式,仅保留基础感知与管控能力,消除空载无效能耗;三是设备全生命周期能效管控,建立单设备能效档案,通过智能电表实现终端设备能耗的精细化计量,实时监测设备能效变化,及时更换老化、能效超标设备,降低运维环节的无效能耗^[3]。

3.2 系统级协同调度节能优化技术

系统级优化是能效提升的核心,核心是实现多系统协同提效。一是交通流适配的动态协同控制,以实时交通流量数据为核心,构建多系统联动控制模型,同步优化信号配时方案、视频感知帧率、道路照明亮度,实现“流量适配、按需供能”,在保障系统服务能力的前提下,最大限度降低运行负载;二是计算与通信架构优化,采用“边缘计算+云端协同”的分布式架构,将数据预处理、本地控制、实时响应功能下沉至边缘

节点,仅向云端传输有效特征数据,减少无效数据传输与云端冗余计算,降低中心机房与通信系统能耗;三是一体化能效管控平台搭建,整合各子系统的能耗数据、运行数据、工况数据,建立全局能效优化模型,实现全系统能耗的集中监测、协同调度与动态优化,打破子系统的数据壁垒,实现全局能效最优^[4]。

3.3 供配电系统能效提升技术

供配电系统优化的核心是降低传输与转换损耗,提升电能利用效率。一是网架结构优化与线路损耗治理,优化供配电线路设计,缩短低压供电半径,选用大截面低损耗线缆,降低线路阻性损耗;对老旧线路进行改造,消除漏电、接触不良等问题,降低线路附加损耗;二是变压器与无功优化,选用高效节能型变压器,根据实际负荷特性合理配置变压器容量,使负载率稳定在 40%~70% 的高效运行区间,降低空载与负载损耗;加装智能无功补偿装置,实现无功功率就地平衡,将系统功率因数提升至 0.95 以上,降低无功损耗;三是谐波治理与电能质量提升,针对非线性负载加装有源电力滤波器,将系统谐波畸变率控制在 5% 以内,消除谐波引发的设备附加损耗与发热,提升设备运行效率;四是分布式光储一体化应用,在路口、机房、高架路段布设分布式光伏电站,配套电化学储能系统,实现光伏发电就地消纳,降低电网购电量,同时利用储能系统平抑负荷峰谷差,提升变压器运行效率,构建源网荷储一体化的能源供给体系。

3.4 全周期能效闭环管控体系

构建“监测—分析—优化—验证—迭代”的全周期能效管控闭环,通过布设智能电表、能耗传感器,实现全系统能耗数据的实时采集、分项计量与可视化展示;基于数字孪生技术搭建智慧交通系统能耗数字孪生模型,模拟不同优化策略的节能效果,确定全局最优运行参数;通过持续的能耗数据监测,验证优化方案的实际效果,迭代更新控制策略与运行参数,实现系统能效的持续提升。

4 优化方案实施路径与效果评定方法

4.1 分阶段实施路径

针对智慧交通系统的建设与运行阶段,采用分阶段实施路径,实现节能效果的阶梯式提升。第一阶段为存量系统快速改造阶段,针对已投运系统,优先开展低成本、快见效的优化措施,包括设备运行模式优化、控制策略精细化调整、无功补偿与谐波治理,同步替换超高耗能老旧设备,快速实现能效提升;第二阶段

为系统协同管控升级阶段,搭建一体化能效管控平台,实现多系统数据互通与协同调度,优化计算与通信架构,推广边缘计算应用,实现系统级的深度节能优化;第三阶段为低碳化能源系统重构阶段,规模化布设分布式光伏与储能系统,实现清洁能源就地消纳,构建源网荷储协同的能源供给体系,实现系统的深度低碳化运行^[5]。

4.2 节能效果量化评定体系

建立多维度、量化的节能效果评定体系,核心评定指标包括综合节电率、单设备能效提升率、供配电系统损耗降低率、单位交通流量能耗强度、碳排放削减量。评定方法采用基准对比法,以优化前连续 3 个月的稳定运行能耗数据为基准,通过回归分析扣除交通流量、气候、光照等外部因素的影响,计算优化后的实际节电率;采用分项计量法,分别评定设备级、系统级、供配电级的节能效果,明确各优化措施的贡献度;采用现场实测与仿真验证相结合的方式,验证优化方案的长期节能效果与系统运行稳定性。

5 结束语

本文针对智慧交通系统的电力能耗管控需求,系统分析了其能耗构成、负荷特性与核心影响因素,构建了覆盖设备级、系统级、供配电级、全周期管控的一体化能耗优化与节能技术体系,明确了分阶段实施路径与量化评定方法。该技术体系从源头降耗、协同提效、能源优化三个维度,解决了智慧交通系统运行过程中的能效浪费问题,可实现系统综合节电率 20% 以上,为智慧交通系统的高效、低碳运行提供了系统性技术支撑。未来研究可进一步深化人工智能在能耗动态优化中的深度应用,探索车路协同系统与新型电力系统的双向互动机制,研发自供能、超低功耗的智慧交通终端设备,持续推动智慧交通系统的零碳化转型。

参考文献:

- [1] 张戢.轨道交通牵引供电系统的设计与优化运行研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [2] 梁建英.城市轨道交通牵引能耗多系统耦合节能优化技术[J].北京交通大学学报,2025,49(05):123-131.
- [3] 蒋颖.城市轨道交通供电系统的节能减排与能耗优化研究[J].工程管理,2023(11):202-204.
- [4] 陆超,詹研.超低能耗居住建筑技术体系优化与工程实践[J].建设监理,2025(S1):51-53.
- [5] 张敏,王雁河,孙周,等.交能融合应用场景与技术体系研究[J].综合智慧能源,2025,47(02):13-28.